

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.011:621.372

**Щерба Анатолий Андрійович**, д-р. техн. наук, член-корр. НАН України, проф., зав. відд.Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, Україна, *пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна*, +380674462554, [sh1ch@ied.org.ua](mailto:sh1ch@ied.org.ua)**Супруновська Наталія Ігорівна**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, Україна, *пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна*, +380677895043, [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@gmail.com)**ВПЛИВ ІНДУКТИВНОСТІ ТА ЄМНОСТІ РОЗРЯДНОГО КОЛА КОНДЕНСАТОРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНИХ УСТАНОВОК НА ЇХНІ ВИХІДНІ СТРУМИ ОБМЕЖЕНОЇ ТРИВАЛОСТІ**

*Досліджено особливості впливу індуктивності та ємності розрядного кола конденсаторів електроімпульсних установок на швидкість і тривалість наростання розрядних струмів від нуля до амплітудних та фіксованих поточних значень. Визначено закономірності змінення середньої швидкості наростання розрядних струмів у навантаженні при примусовому обмеженні їхньої тривалості та змінненні індуктивності і ємності розрядного кола.*

**Ключові слова:** конденсатор, розрядний струм, тривалість, швидкість наростання, напівпровідниковий комутатор, ємність, індуктивність, навантаження.

**Щерба Анатолий Андреевич**, д-р. техн. наук, член-корр. НАН Украины, проф., зав. отд.Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, *пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина*, +380674462554, [sh1ch@ied.org.ua](mailto:sh1ch@ied.org.ua)**Супруновская Наталия Игоревна**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, *пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина*, +380677895043, [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@gmail.com)**ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ КОНДЕНСАТОРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ УСТАНОВОК НА ИХ ВЫХОДНЫЕ ТОКИ ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

*Исследованы особенности влияния индуктивности и емкости разрядной цепи конденсаторов электроимпульсных установок на скорость и длительность нарастания разрядных токов от нуля до амплитудных и фиксированных текущих значений. Определены закономерности изменения средней скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при принудительном ограничении их длительности и изменении индуктивности и емкости разрядной цепи.*

**Ключевые слова:** конденсатор, разрядный ток, длительность, скорость нарастания, полупроводниковый коммутатор, емкость, индуктивность, нагрузка.

**Shcherba Anatolii Andriovych**, Doc. Eng. Sc., Cor. Mem. NAS of Ukraine, prof., head of depart.Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, *prospect Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine*, +380674462554, [sh1ch@ied.org.ua](mailto:sh1ch@ied.org.ua)**Suprunovska Nataliia Igorivna**, Cand. Sc. (Eng.), SRFInstitute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, *prospect Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine*, +380677895043, [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@gmail.com)**INFLUENCE OF INDUCTANCE AND CAPACITANCE OF DISCHARGE CIRCUIT OF CAPACITORS OF SEMICONDUCTOR PULSE INSTALLATIONS ON ITS OUTPUT CURRENTS WITH LIMITED DURATION**

*The features of influence of inductance and capacity of a discharge circuit of capacitors of electro-pulse installations on the rate and duration of discharge currents rise from zero to the peak and fixed current values are investigated. The regularities of change of average rate of discharge currents rise in load at forced limitation of their duration and change of inductance and capacity of a discharge circuit are defined.*

**Key words:** capacitor, discharge current, duration, capacity, rate of rise, semiconductor commutator, capacitance, inductance, load.

**Введение**

Эффективность разрядно-импульсных технологий определяется возможностью повышения импульсной электрической мощности в технологической нагрузке [1–7, 10, 11]. Поскольку потребляемая в нагрузке мощность прямо пропорциональна величине ее электрического сопротивления и квадрату протекающего в ней тока, то совершенствование

формирователей разрядных импульсов обычно направлено на формирование больших импульсных токов, повышение скорости их нарастания и уменьшение их длительности. Так уменьшение длительности разрядных токов и увеличение скорости их нарастания в установках объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) токопроводящих материалов в диэлектрической жидкости позволяет уменьшать максимальные размеры получаемых искроэрозионных порошков и разрабатывать новые энергоэффективные нанотехнологии [1–4, 7–9].

Таким образом, задача уменьшения длительности больших разрядно-импульсных токов и увеличения скорости их нарастания в нагрузке является актуальной, а для ее решения важно установить особенности изменения характера переходных процессов при разряде накопительного конденсатора на нагрузку и выявить закономерности, увеличивающие скорость нарастания разрядных токов и уменьшающие их длительность. В работах [4, 8] было показано, что одним из методов повышения средней скорости нарастания разрядных токов в нагрузке является принудительное ограничение их длительности. Поэтому *целью данной работы* было определение закономерностей изменения средней скорости нарастания разрядных токов в нагрузке от нуля до текущих фиксированных значений при принудительном ограничении их длительности, а также изменении индуктивности и емкости разрядной цепи.

Наличие в разрядной цепи конденсатора нелинейного электрического сопротивления нагрузки в большинстве случаев не позволяет получать аналитическое решение данной задачи. Поэтому в работах [1, 4, 8] электрическое сопротивление нагрузки линейризовалось и представлялось энергетически эквивалентным линейным сопротивлением, в котором потреблялась такая же электрическая энергия, как и при разряде конденсатора на реальную нелинейную электроискровую нагрузку.

На рис. 1 представлена электрическая схема полупроводникового формирователя разрядных импульсов (ФРИ) установок ОЭИД слоя металлических гранул в жидкости.

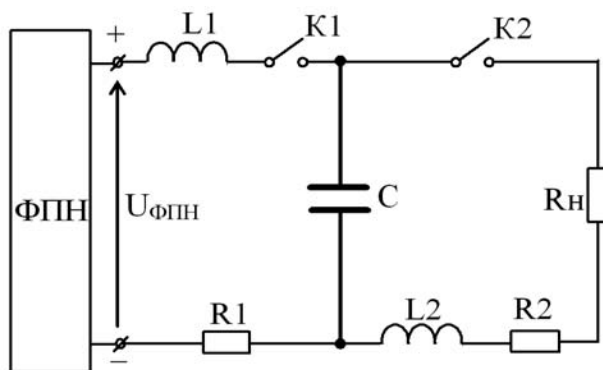


Рис. 1. Электрическая схема формирователя разрядных импульсов с емкостным накопителем электрической энергии.

В качестве коммутаторов в схеме были использованы полностью управляемые полупроводниковые ключи  $K_1$  и  $K_2$ . Заряд накопительного конденсатора  $C$  осуществлялся от полупроводникового формирователя постоянного напряжения (ФПН) по контуру  $\PhiПН^+ - L_1 - K_1 - C - R_1 - \PhiПН^-$ , а его разряд – по контуру  $C - K_2 - R_H - R_2 - L_2 - C$ .

При неизменном от цикла к циклу напряжении заряда конденсатора  $U_{0C}$  величина тока его разрядов определяется сопротивлением нагрузки  $R_H$ , емкостью конденсатора  $C$ , индуктивностью  $L_2$  и активным сопротивлением  $R_2$  соединительных проводов.

### Влияние индуктивности цепи разряда конденсатора на параметры тока

Переходные процессы анализировались в разрядной цепи конденсатора  $C$  схемы, представленной на рис. 1. Параметры цепи выбирались соответствующими параметрам реально действующих разрядно-импульсных установок объемного электроискрового диспергирования металлических гранул в диэлектрических жидкостях: емкость конденсатора  $C = 100$  мкФ, напряжение его заряда  $U_{0C} = 500$  В, индуктивность разрядной цепи  $L_2$  варьировалась от 40 до 0,28 мкГн, линейризованное электрическое сопротивление нагрузки с учетом активного сопротивления контура  $R_H + R_2 = 0,1$  Ом. Расчеты и обработка результатов проводились с использованием программного пакета Mathcad 12. При проведении численных экспериментов учитывалось, что в реальных установках ОЭИД слоя

металлических гранул в жидкости энергетически наиболее целесообразными являются режимы колебательного разряда конденсатора на нагрузку с небольшим (до 30 %) его перезарядом по напряжению [1, 4–6].

На рис. 2 представлено изменение разрядного тока при колебательных разрядах конденсатора на нагрузку (см. рис. 2 а) и аperiodических режимах (см. рис. 2 б), возникающих при уменьшении индуктивности разрядной цепи в 144 раза. При этом добротность разрядной цепи  $Q$  уменьшалась в 12 раз (от 4,47 до 0,37).

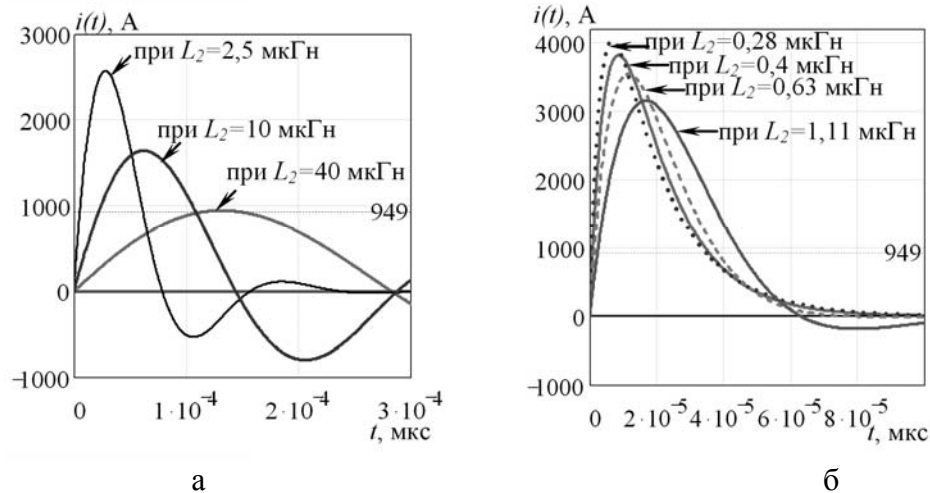


Рис. 2. Изменение разрядного тока при разряде конденсатора на нагрузку:  
а – колебательные и слабо-колебательные разряды, б – аperiodические разряды

#### **Анализ средней скорости нарастания разрядного тока до амплитудного значения.**

В табл. 1 приведены результаты расчета значений максимальных токов  $I_{\max i}$  разряда конденсатора на нагрузку, времени достижения токами максимальных значений  $\Delta t_{\max i}$  и средних скоростей нарастания токов, определяемых по формуле  $I_{\max i} / \Delta t_{\max i}$ .

Также в таблице приведены:

- значения коэффициента  $k_1$ , определяющего во сколько раз увеличилась средняя скорость нарастания тока от нуля до максимального значения в текущем режиме по сравнению с режимом, в котором ее значение было минимальным;
- значения коэффициента  $k_2$ , определяющего во сколько раз уменьшилась длительность нарастания тока от нуля до максимального значения в текущем режиме по сравнению с режимом, в котором ее значение было максимальным.

Таблица 1

$L_2$ , мкГн	40	10	2,5	1,11	0,63	0,4	0,28
$Q$	4,47	2,24	1,12	0,75	0,56	0,45	0,37
$I_{\max i}$ , А	949	1642	2571	3151	3540	3811	4012
$\Delta t_{\max i}$ , мкс	131,4	61,8	27,6	16,8	11,4	8,4	6,6
$I_{\max i} / \Delta t_{\max i}$ , А/мкс	7,2	26,6	93,2	187,6	310,5	453,7	607,9
$k_1$	1	3,7	12,9	26,1	43,1	63,0	84,4
$k_2$	1	2,1	4,8	7,8	11,5	15,6	19,9

при  $L_2$  равным 0,63; 0,4 и 0,28 мкГн – близким к критическому режиму и аperiodическим с наибольшей скоростью нарастания тока.

Согласно полученным результатам, при уменьшении индуктивности разрядного контура  $L_2$  от 40 до 0,28 мкГн длительность  $\Delta t_{\max i}$  нарастания разрядного тока от нуля до максимального значения уменьшается в 19,9 раз, а средняя скорость его нарастания  $I_{\max i} / \Delta t_{\max i}$  увеличивается в 84,4 раза.

Как видно из табл. 1 при уменьшении индуктивности разрядной цепи конденсатора  $L_2$  от 40 до 10 мкГн режим разряда оставался колебательным, амплитуда разрядного тока увеличивалась, а скорость его нарастания увеличивалась еще быстрее. При дальнейшем уменьшении значений  $L_2$  до 2,5 и 1,11 мкГн переходной процесс становился слабо-колебательным, а

Анализируя такое изменение во времени скорости нарастания тока, можно отметить, что она максимальна при наименьших его значениях и стремится к нулю по мере приближения тока к амплитудному значению. Поэтому в работе был проведен анализ средней скорости нарастания разрядных токов до текущих значений, то есть при их принудительном прерывании раньше, чем они достигнут своих амплитудных значений.

#### **Анализ средней скорости нарастания разрядного тока до текущих значений.**

Был проведен анализ изменения средней скорости нарастания токов разряда конденсатора от нуля до текущих значений, меньших, чем возможные амплитудные значения.

Таблица 2

$L_2$ , мкГн	40	10	2,5	1,11	0,63	0,4	0,28
$Q$	4,47	2,24	1,12	0,75	0,56	0,45	0,37
$I_{\text{фикс } i}$ , А	949	949	949	949	949	949	949
$\Delta t_{\text{фикс } i}$ , мкс	131,4	21,9	5,3	2,3	1,3	0,8	0,6
$I_{\text{фикс}} / \Delta t_{\text{фикс } i}$ , А/мкс	7,2	43,3	180,8	407,3	741,4	1157,3	1636,2
$k_3$	1,0	6,0	25,0	56,4	102,7	160,2	226,6
$k_4$	1,0	6,0	25,0	56,4	102,7	160,2	226,6

В качестве примера в табл. 2, приведены результаты расчета значений длительности времени  $\Delta t_{\text{фикс } i}$ , за которые токи разряда конденсатора достигают фиксированного значения  $I_{\text{фикс}} = 949$  А, равного наименьшему из рассмотренных амплитудных значений. Для этих же условий определялись и

средние скорости нарастания токов разряда конденсатора на нагрузку.

В табл. 2, как и в табл. 1 приведены:

- значения коэффициента  $k_3$ , определяющего во сколько раз увеличилась средняя скорость нарастания тока до выбранного фиксированного значения  $I_{\text{фикс}} = 949$  А в текущем режиме по сравнению с режимом, в котором ее значение было минимальным;
- значения коэффициента  $k_4$ , определяющего во сколько раз уменьшилась длительность нарастания тока до фиксированного значения  $I_{\text{фикс}} = 949$  А в текущем режиме по сравнению с режимом, в котором ее значение было максимальным.

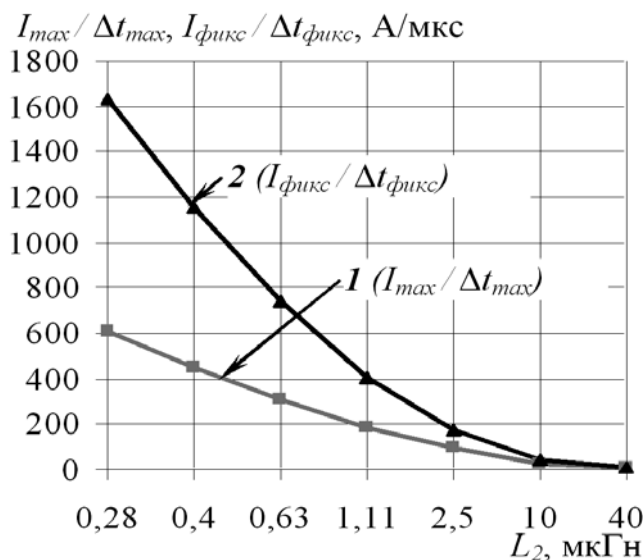


Рис. 3. Зависимости средней скорости нарастания разрядного тока в нагрузке от величины индуктивности разрядной цепи

фиксированного значения  $I_{\text{фикс}} = 949$  А, равного наименьшему из рассмотренных амплитудных значений (кривая 2).

Сравнивая данные, приведенные в табл. 1 и табл. 2, отметим, что при уменьшении индуктивности  $L_2$  от 40 до 0,28 мкГн скорость нарастания разрядного тока от нуля до выбранного фиксированного значения  $I_{\text{фикс}} = 949$  А в 2,7 раза превышает скорость нарастания тока от нуля до максимального (амплитудного) значения  $I_{\text{max}}$ . При этом

В рассматриваемом случае (когда величина тока фиксирована)  $k_3 = k_4$ .

Как видно из данных табл. 2, при уменьшении  $L_2$  от 40 до 0,28 мкГн длительность  $\Delta t_{\text{фикс } i}$  нарастания разрядного тока от нуля до фиксированного значения  $I_{\text{фикс}} = 949$  А, равного наименьшему из рассмотренных амплитудных значений, уменьшается в 226,6 раз, и во столько же раз увеличивается средняя скорость нарастания разрядного тока  $I_{\text{фикс}} / \Delta t_{\text{фикс } i}$ .

На рис. 3 показаны зависимости средней скорости нарастания разрядного тока  $I_{\text{max}} / \Delta t_{\text{max}}$  от величины индуктивности разрядной цепи для двух рассмотренных случаев: при нарастании тока от 0 до  $I_{\text{max}}$  (кривая 1) и от 0 до

длительность нарастания разрядного тока от нуля до  $I_{\text{фикс}}$  в 11,4 раза меньше длительности нарастания тока от нуля до максимального значения  $I_{\text{max}}$ .

На рис. 4 представлены зависимости относительных (приведенных к минимальной скорости нарастания тока) скоростей нарастания разрядного тока конденсатора в текущем режиме (см. кривые 1 и 3) и относительных (приведенных к максимальной длительности тока) длительностей разрядного тока (см. кривые 2 и 4) от изменения значений

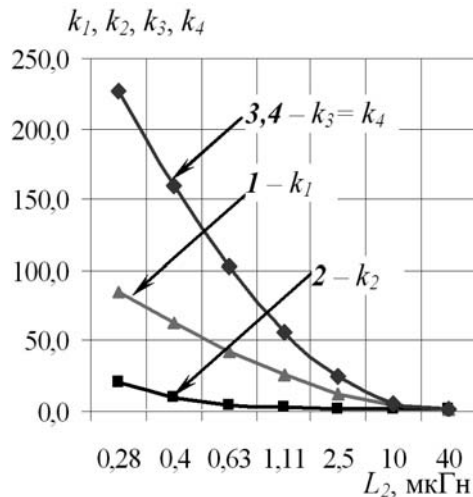


Рис. 4. Изменение относительной средней скорости (кривые 1 и 3) и длительности (кривые 2 и 4) нарастания тока в нагрузке в текущем режиме при изменении индуктивности разрядной цепи  $L_2$  от 0,28 до 40 мкГн. Кривые 1, 3 соответствуют нарастанию тока от 0 до  $I_{\text{max}}$ , кривые 2, 4 – от 0 до  $I_{\text{фикс}}$

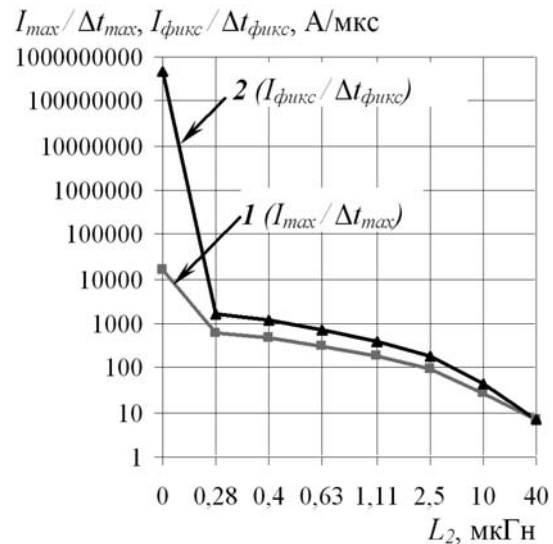


Рис. 5. Изменение средней скорости нарастания тока в нагрузке при изменении индуктивности разрядной цепи  $L_2$  от  $10^{-12}$  до 40 мкГн. Кривая 1 соответствует нарастанию тока от 0 до  $I_{\text{max}}$ , кривая 2 – от 0 до  $I_{\text{фикс}}$

индуктивности разрядной цепи  $L_2$  от 0,28 до 40 мкГн. Кривые 1, 3 соответствуют нарастанию разрядного тока от 0 до  $I_{\text{max}}$ , а кривые 2, 4 – от 0 до  $I_{\text{фикс}}$ .

Теоретически, уменьшая индуктивность  $L_2$  разрядной цепи до значений, близких к нулю, можно повышать скорость нарастания токов до чрезвычайно больших значений, как показано на рис. 5 (ось ординат представлена в логарифмическом масштабе). Но практически в разрядном контуре лабораторных установок ОЭИД металлических гранул в жидкости мы достигали  $L_2 \approx 0,2 \text{ мкГн}$ , а в промышленных  $L_2 \approx 1\text{--}5 \text{ мкГн}$ .

Проведенный анализ особенностей изменения токов разряда конденсаторов при изменении индуктивности разрядной цепи позволяет уточнять допустимый диапазон повышения скорости нарастания таких токов при принудительном ограничении их длительности. Определим отличительные особенности изменения скорости нарастания тока в нагрузке от 0 до фиксированных текущих значений  $I_{\text{фикс}} < I_{\text{max}}$  при изменении индуктивности и емкости элементов разрядного контура. Для этого уточним отраженные в работе [8] закономерности изменения разрядных токов при увеличении емкости разряжаемых конденсаторов в широком диапазоне.

#### Влияние емкости конденсатора на параметры разрядных токов.

##### Особенности изменения скорости нарастания тока до амплитудного значения.

Исследования проводились при неизменных значениях индуктивности разрядной цепи  $L_2 = 10^{-6} \text{ Гн}$ , активного сопротивления нагрузки  $R = 0,1 \text{ Ом}$  (с учетом активного сопротивления разрядного контура), напряжения заряда конденсатора  $U_{0C} = 500 \text{ В}$  и изменении емкости  $C$  от 50 до 1200 мкФ.

Было установлено, что при добротности разрядного контура  $Q > 5$  (т.е. при возникновении в разрядном контуре слабо затухающих колебательных режимов разряда конденсатора) изменение емкости конденсатора практически не позволяет увеличивать среднюю скорость нарастания тока от нуля до амплитудного значения.

Более того, при сильно затухающих колебательных режимах (возникающих при увеличении емкости конденсатора  $C$  от 50 до 300 мкФ и добротности разрядного контура  $0,5 < Q < 2$ ) и апериодических режимах (возникающих при увеличении емкости конденсатора  $C$  от 450 до 1200 мкФ и добротности разрядного контура  $Q < 0,5$ ) увеличение емкости конденсатора вызывало уменьшение средней скорости нарастания разрядного тока от нуля до амплитудного значения (при увеличении амплитудного значения разрядного тока длительности его нарастания от нуля до максимального значения увеличивалась еще больше). Было отмечено также, что при апериодических разрядах средняя скорость нарастания разрядных токов от нуля до максимального еще меньше, чем при слабо-колебательных разрядах. Так, например, при увеличении  $C$  от 50 до 1200 мкФ длительность  $\Delta t_{max}$  нарастания разрядного тока от нуля до максимального значения увеличилась более, чем в 3 раза, а средняя скорость нарастания тока  $I_{max} / \Delta t_{max}$  уменьшилась более, чем в 1,6 раза.

**Скорость нарастания тока до текущего значения, меньшего, чем амплитудное.**

Анализ токов разряда конденсатора при принудительном их прерывании раньше, чем они достигнут своих максимальных значений, показал, что увеличение в таком случае емкости конденсатора вызывает увеличение средней скорости разрядного тока независимо от характера разряда (колебательного или апериодического) [8]. Такая зависимость определяется тем, что увеличение емкости конденсатора вызывает уменьшение времени нарастания разрядного тока от нуля до фиксированного текущего значения, меньшего, чем амплитудное.

Однако при многократном увеличении емкости  $C$  (т.е. при уменьшении добротности разрядного контура) сокращение времени достижения током значения  $I_{фикс}$  (а следовательно

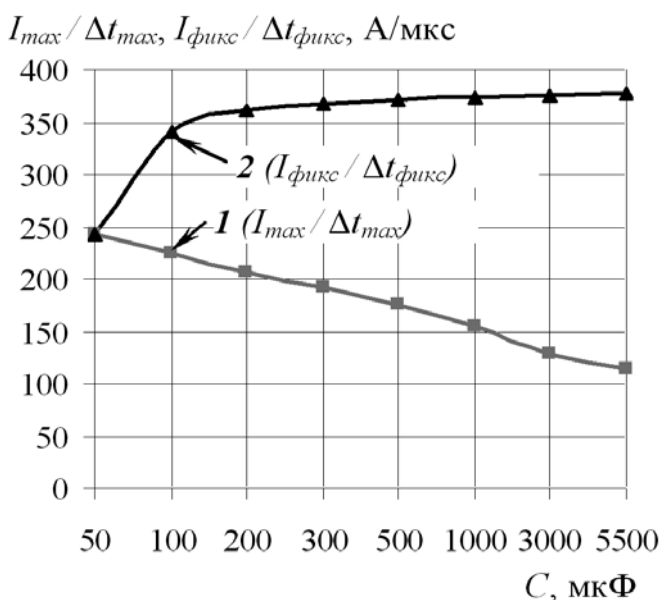


Рис. 6. Зависимости средней скорости нарастания разрядного тока в нагрузке от величины емкости разряжаемого конденсатора. Кривая 1 соответствует нарастанию тока от 0 до  $I_{max}$ , кривая 2 — от 0 до  $I_{фикс}$

и увеличение скорости его нарастания) становится все меньшим. Так с увеличением емкости  $C$  в 2 раза (от 50 до 100 мкФ) и колебательном ее разряде время  $\Delta t_{фикс}$  уменьшается (а скорость нарастания  $I_{фикс} / \Delta t_{фикс}$  увеличивается) в 1,4 раза, а при увеличении  $C$  в 11 раз (от 500 до 5500 мкФ) и апериодическом разряде емкости время  $\Delta t_{фикс}$  уменьшается (а скорость нарастания  $I_{фикс} / \Delta t_{фикс}$  увеличивается) всего 1,02 раза.

Следует учитывать что, чем больше отличается значение  $I_{фикс}$  от максимально возможного разрядного тока  $I_{max}$ , тем меньше увеличение емкости конденсатора  $C$  изменяет скорость нарастания тока до значения  $I_{фикс}$ . Так, если значение  $I_{фикс} < 0,5 I_{max}$ , то при увеличении емкости  $C$  в 11 раз (от 500 до 5500 мкФ) значение  $I_{max}$  увеличивается в 1,24 раза, а скорость нарастания тока до значения  $I_{фикс} = 2238$  А увеличивается всего в 1,04 раза [8]. Таким образом с увеличением емкости  $C$  в  $n$  – раз

средняя скорость нарастания тока  $I_{фикс} / \Delta t_{фикс}$  будет также увеличиваться, но в  $m$  – раз, где  $m < n$ . Но с увеличением значения  $I_{фикс}$  время  $\Delta t_{фикс}$  будет уменьшаться быстрее и увеличение

скорости нарастания тока  $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$  будет происходить в большее число раз, т. е. значение коэффициента  $m$  будет возрастать.

На рис. 6 показаны зависимости средней скорости нарастания разрядного тока от величины емкости конденсатора для двух случаев: нарастания тока от 0 до  $I_{\text{max}}$  (кривая 1) и от 0 до  $I_{\text{фикс}} = 2238$  А – наименьшего из всех амплитудных значений – (кривая 2).

Как отмечалось в работе [8] при  $C > C_{\text{кр}}$ , при котором  $\alpha^2 \gg \omega_0^2$  (где  $\alpha = (R_n + R_2) / 2L_2$ ,  $\omega_0 = (1/L_2C)^{1/2}$ ), кривая разрядного тока приближается к кривой, описываемой выражением:

$$i(t) \approx U_{0C} (1 - e^{-(R_n + R_2)t/L_2}) / (R_n + R_2).$$

При многократном увеличении емкости  $C$  значение тока  $I_{\text{max}} \rightarrow U_{0C}/(R_n + R_2)$ . Поэтому, для уменьшения значения  $\Delta t_{\text{фикс}}$  и увеличения скорости нарастания тока  $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$  есть предельное значение емкости  $C = C_{\text{кр}}$ , больше которого ее увеличивать нецелесообразно.

В то же время при  $C < C_{\text{кр}}$  увеличение емкости разряжаемых конденсаторов и принудительное прерывание разрядного тока является эффективным методом уменьшения значения  $\Delta t_{\text{фикс}}$  и увеличения значения  $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$  как для колебательных, так и апериодических режимов разряда конденсатора на линейную нагрузку.

### Выводы

1. Проведенные исследования подтвердили, что уменьшение индуктивности разрядного контура конденсатора полупроводниковых электроимпульсных установок при всех режимах его разряда (колебательных, близких к критическим и апериодических) уменьшает длительность нарастания разрядного тока от нуля до максимального значения и увеличивает среднюю скорость его нарастания.

С уменьшением индуктивности указанные зависимости проявляются сильнее. В частности при уменьшении индуктивности от 40 до 0,28 мкГн длительность нарастания разрядного тока от нуля до максимального значения уменьшается в 20 раз, а средняя скорость его нарастания увеличивается в 84 раза. Еще сильнее эти закономерности проявляются при нарастании токов в нагрузке от нуля до фиксированного значения, меньшего, чем амплитудное. Так при ранее указанном уменьшении индуктивности длительность нарастания тока от нуля до фиксированного значения (равного минимальному из всех рассмотренных) уменьшается в 227 раз и во столько же раз увеличивается средняя скорость его нарастания.

2. При увеличении емкости конденсатора средняя скорость нарастания его разрядного тока до своего максимального значения практически не изменяется в слабо затухающих колебательных режимах (при добротности контура  $Q > 5$ ) и уменьшается при близких к критическим и апериодическим режимам разряда.

Увеличение емкости разряжаемых конденсаторов с принудительным прерыванием разрядного тока при достижении им произвольного фиксированного значения  $I_{\text{фикс}}$ , меньшего, чем максимально возможный ток  $I_{\text{max}}$ , приводит к увеличению средней скорости нарастания импульсного тока в нагрузке  $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$ . Однако при многократном увеличении емкости  $C$  увеличение скорости нарастания тока от нуля до  $I_{\text{фикс}}$  становится все менее заметным. Так с увеличением емкости  $C$  в 2 раза (от 50 до 100 мкФ) при колебательном ее разряде скорость нарастания  $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$  увеличивается в 1,4 раза, а при увеличении  $C$  в 11 раз (от 500 до 5500 мкФ) разряд становится апериодическим и скорость нарастания  $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$  увеличивается всего на 1,02 раза.

3. С увеличением величины фиксированного значения тока  $I_{\text{фикс}}$  увеличение скорости нарастания тока  $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$  будет монотонно возрастать по мере увеличения емкости конденсатора. Причем расширить диапазон регулирования динамических параметров разрядных импульсов при увеличении емкости  $C$  можно за счет увеличения выбранного фиксированного значения разрядного тока  $I_{\text{фикс}}$ , если это целесообразно для данной технологии.

В тоже время надо учитывать, что при выбранном значении тока  $I_{\text{фикс}}$  увеличение емкости конденсатора  $C$  выше критического значения  $C_{\text{кр}}$  будет малоэффективным, поскольку в этом случае зависимость  $I_{\text{max}}(C)$  асимптотически стремится к постоянной величине  $U_{0C}/R$ , где  $U_{0C}$  – напряжение зарядки конденсатора,  $R$  – сопротивление нагрузки и разрядного контура.

#### Список использованной литературы

1. Асанов У. А., Цой А. Д., Щерба А. А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов. Фрунзе: Илим, 1990, 256 с.
2. A. E.Berkowitz, M. F.Hansen, F. T.Parker, K. S.Vecchio, F. E.Spada, E. J.Lavernia, R. Rodriguez Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – January, V. 254–255. – P. 1–6.
3. Nguyen P. K., Lee K. H., Moon J., Kim K. A., Ahn K. A., Chen L. H., Lee S. M., Chen R. K., Jin S. and Berkowitz A.E., "Spark erosion: a high production rate method for producing  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  nanoparticles with enhanced thermoelectric performance", *Nanotechnology*, 23 (2012), P. 1–7.
4. Шидловский А. К., Щерба А. А., Супруновская Н. И. Энергетические процессы в цепях заряда и разряда конденсаторов электроимпульсных установок // К.: Интерконтиненталь-Украина, 2009. – 208 с.
5. Щерба А. А., Супруновская Н. И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. электродинамика. – 2014. – № 1. – С. 3–11.
6. Щерба А. А., Супруновская Н. И., Иващенко Д. С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам // Техн. электродинамика. – 2014. – № 3. – С. 12–18.
7. Casanueva R., Azcondo F.J, Branas C., Bracho S. Analysis, design and experimental results of a high-frequency power supply for spark erosion // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2005. – Vol. 20. – P. 361–369.
8. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Техн. электродинамика. – 2012. – № 5. – С. 3–9.
9. Sen B., Kiyawat N., Singh P.K., Mitra S., Ye J.H., Purkait P. Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM) // *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. – 2003, PEDS 2003. – Vol. 1. – P. 659–664.
10. J. Carrey, H.B. Radousky, A.E. Berkowitz Spark-eroded particles: Influence of processing parameters // *Journal of Applied Physics*. – 1 February 2004. – V. 95. – № 3. – P. 823–829.

#### References

1. Asanov, U. A., Tsoi, A. D., Shcherba, A. A., Kazekin, V. I. (1990), *Electroerosive technology of compounds and metal powders*. [Elektroerozionnaya tehnologiya soedineniy i poroshkov metallov], Ilim, Frunze, 256 p.
2. Berkowitz, A. E., Hansen, M. F., Parker, F. T., Vecchio, K. S., Spada, F. E., Lavernia, E. J., Rodriguez, R. (2003), "Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion", *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, V. 254–255, P. 1–6.
3. Nguyen, P. K., Lee, K. H., Moon, J., Kim, K. A., Ahn, K. A., Chen, L. H., Lee, S. M., Chen, R. K., Jin, S. and Berkowitz, A.E. (2012), "Spark erosion: a high production rate method for producing  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  nanoparticles with enhanced thermoelectric performance", *Nanotechnology*, No 23, P.1–7.
4. Shidlovskiy, A. K., Shcherba, A. A., Suprunovskaya, N. I. (2009), *Power processes in the electropulse installations with capacitive energy storages* [Energeticheskie protsessy v tsepyah zaryada i razryada kondensatorov elektroimpul'snykh ustanovok], Intercontinental-Ukraine, Kiev, 208 p.
5. Shcherba, A. A., Suprunovskaya, N. I. (2014), "Synthesis of electric circuits with capacitive energy storages in semi-conductor shapers of powerful discharge pulses" [Sintez elektricheskikh tsepey s emkostnymi nakopitelyami energii v poluprovodnikovyykh formirovatel'nykh moschnyykh razryadnykh impul'sov], *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 1, P. 3–11.
6. Shcherba, A. A., Suprunovskaya, N. I., Ivashchenko, D. S. (2014), "Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load for synthesis of a circuit of the discharge of the capacitor under time characteristics" [Modelirovaniye nelineynogo soprotivleniya elektroiskrovoy nagruzki dlya sinteza tsepi razryada kondesatora po vremennym harakteristikam], *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 3, P. 12–18.
7. Casanueva, R., Azcondo, F. J, Branas, C., Bracho, S. (2005), "Analysis, design and experimental results of a high-frequency power supply for spark erosion", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20, P. 361–369.
8. Shcherba, A.A, Suprunovskaya, N.I. (2012), "Increasing regularities of rate of current rise in the load at limiting its maximal values" [Zakonomernosti povysheniya skorosti narastaniya razryadnykh tokov v nagruzke pri ogranichenii ih maksimalnykh znacheniy], *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 5, P. 3–9.
9. Sen, B., Kiyawat, N., Singh, P. K., Mitra, S., Ye, J. H., Purkait, P. (2003), "Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM)", *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, PEDS 2003, Vol. 1, P. 659–664.
10. Carrey, J., Radousky, H. B., Berkowitz, A. E. (2004), "Spark-eroded particles: Influence of processing parameters", *Journal of Applied Physics*, V. 95, No. 3, P. 823–829.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.



УДК 621.314.5

**Бачурин Петр Александрович**, асп., Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073, тел. +73833460866, E-mail: [bach\\_rp@mail.ru](mailto:bach_rp@mail.ru)

**Коробков Дмитрий Владиславович**, асс, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073, тел. +73833460866, E-mail: [kpe@ngs.ru](mailto:kpe@ngs.ru)

**Харитонов Сергей Александрович**, д-р, техн. наук, проф., заведующий кафедрой электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073, тел. +73833460866, E-mail: [Kharit1@yandex.ru](mailto:Kharit1@yandex.ru), (orcid.org/0000-0001-6483-9460)

**Хлебников Алексей Сергеевич**, главный конструктор по направлению СЭС ОАО «Авиационное оборудование», г. Москва, Россия, ул. Ибрагимова, 29, г. Москва, Россия, 105318, тел. +7915-393-35-42, E-mail: [aleksey\\_khlebnikov@mail.ru](mailto:aleksey_khlebnikov@mail.ru)

## СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ

*Анализируется вариант построения системы генерирования электрической энергии постоянного тока на базе магнитоэлектрического генератора и активного выпрямителя. Определены основные энергетические характеристики в различных режимах работы системы.*

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический генератор, энергетические характеристики, стабилизация напряжения, активный выпрямитель.

**Bachurin Petr Aleksandrovich**, Ph. D. student, Novosibirsk state technical university, 20 K. Marksa str, Novosibirsk, 630092, Russia. Tel.: +7(383)346-08-64, E-mail: [bach\\_rp@mail.ru](mailto:bach_rp@mail.ru)

**Korobkov Dmitry Vladislavovich**, assistant, Novosibirsk state technical university, 20 K. Marksa str, Novosibirsk, 630092, Russia. Tel.: +7(383)346-08-64, E-mail: [kpe@ngs.ru](mailto:kpe@ngs.ru)

**Kharitonov Sergey Aleksandrovich**, Ph. D., Professor, head of the Department of electronics and electrical engineering. Novosibirsk state technical university, 20 K. Marksa str, Novosibirsk, 630092, Russia. Tel.: +7(383)346-08-64, E-mail: [Kharit1@yandex.ru](mailto:Kharit1@yandex.ru), (orcid.org/0000-0001-6483-9460)

**Khlebnikov Aleksey Sergeevich**, design manager of power generation systems, Aviation Equipment Holding, 29 Ibragimova street, Moscow, Russia, 105318, Tel. +7915-393-35-42, E-mail: [aleksey\\_khlebnikov@mail.ru](mailto:aleksey_khlebnikov@mail.ru)

## DIRECT CURRENT SUPPLY SYSTEM WITH MAGNETOELECTRICAL GENERATOR

*The dc power generation system based on permanent-magnet generator and active rectifier is considered. The main energy characteristics of generation system performance are obtained.*

**Keywords:** permanent-magnet generator, energy characteristics, constant-voltage regulation, active rectifier.

### Введение

В настоящее время фактически всё бортовое оборудование летательного аппарата в той или иной степени является потребителем электроэнергии, при этом с развитием авиационно-космической техники повышается количество систем оборудования, потребляющих только электрическую энергию. Наряду с этим неуклонно увеличивается общее энергопотребление, что делает установленную мощность электростанций некоторых самолётов соизмеримой с мощностью подстанций небольших городов [4].

На существующих самолётах и вертолётах в основном применяются системы электроснабжения постоянного тока 27 В, переменного тока постоянной частоты 115/200 В 400 Гц и переменного тока. В последнее время, с увеличением мощности потребителей, становится актуальным переход на системы электроснабжения постоянного тока с повышенным напряжением. Так, например, в структуре системы генерирования электрической энергии на борту самолёта Boeing 787, в котором нашли свое применение самые последние достижения в области авиастроения, широко применяется система электроснабжения постоянного тока  $\pm 270$  В [4].

Вопрос о выборе типа систем электроснабжения перспективных летательных аппаратов достаточно широко обсуждается в течение многих лет, причём уже в 1970-х гг. отмечалась перспективность систем постоянного тока повышенного напряжения.

Ожидается, что в наибольшей степени преимущества такой системы реализуются в самолётах с полностью электрифицированным оборудованием СПЭО (наиболее полно системы 270 В отвечают требованиям таких ответственных элементов СПЭО, как электромеханический привод и электронные системы управления).

Помимо этого, в качестве преимуществ такой системы электроснабжения над традиционными системами электроснабжения переменного тока отмечают:

- снижение общей массы системы электроснабжения на 25%;
- снижение массы электронных устройств контроля и управления на 40%;
- улучшения качества электроэнергии (в частности, в переходных режимах);
- повышение КПД системы на 15%;
- исключение перерывов в питании [2,3].

В статье рассматривается система генерирования постоянного напряжения 270 В (СГПН-270В) мощностью 120 кВт на базе магнитоэлектрического генератора и активного выпрямителя (АВ). Рассматриваемая система генерирования, состоящая из магнитоэлектрического генератора (МЭГ) и активного выпрямителя (АВ), показана на рис. 1.

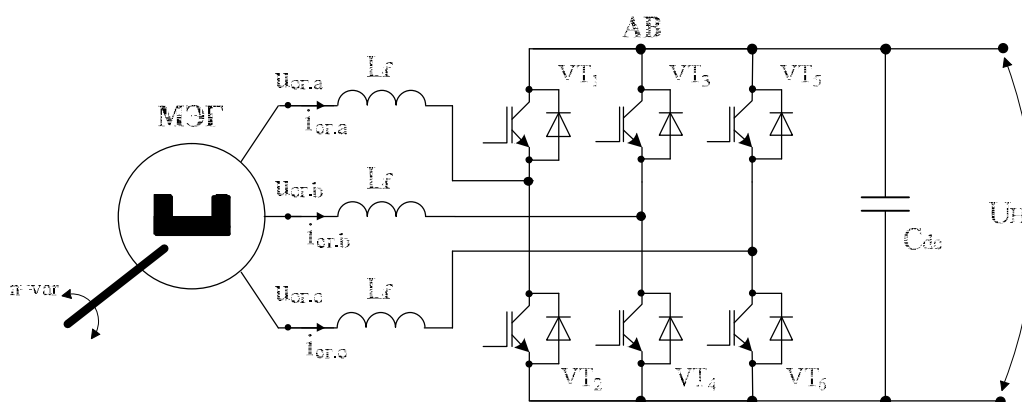


Рис. 1. Схема СГПН-270В на базе МЭГ и АВ.

Применение в качестве АВ инвертора напряжения (ИН) с ШИМ на частоте ( $\omega_{\text{ШИМ}}$ ), значительно большей частоты напряжения магнитоэлектрического генератора ( $\omega_{\text{СГ}}$ ), позволяет реализовать ряд преимуществ, существенно влияющих на установленную мощность генератора в составе СГЭЭ.

АВ на базе ИН с ШИМ позволяет:

- реализовать потребление практически синусоидального тока от МЭГ;
- регулировать коэффициент мощности потребляемой энергии от МЭГ;
- осуществлять глубокое регулирование выходного напряжения, включая возможность его повышения.

Особенностью системы является то, что при изменении скорости вращения вала изменяется частота и величина ЭДС МЭГ, это значительно влияет на режимы работы АВ.

Исследование системы проводилось в два этапа:

- с помощью аналитической модели;
- посредством имитационного моделирования с помощью специализированного пакета программ PSIM.

#### Аналитическая модель

Допущения:

- учитывая, что  $\omega_{\text{ШИМ}} \gg \omega_{\text{СГ}}$ , расчет ведется по основной гармонике напряжения СГ;
- напряжение  $u_{\text{dc}} \approx U_{\text{dc}}$ , т.е. пульсации отсутствуют;
- магнитная система СГ ненасыщенна.

Математическая модель электрических цепей магнитоэлектрического синхронного генератора (СГ) и входных цепей ИН во вращающейся синхронно с ротором системе координат ( $dq$ ), при условии ориентации оси  $d$  по продольной оси СГ, будет иметь вид [1]:

$$u = R \cdot i + \frac{d}{dt} \psi + \omega \cdot \psi,$$

$$\psi = L \cdot i + \psi_f,$$

Выбрав в качестве переменных токи СГ, переходя к скалярной форме записи, получим:

$$u_d = i_d \cdot r_s + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q,$$

$$u_q = i_q \cdot r_s + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Psi_f,$$
(1)

где:  $u_d$ ,  $u_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  – напряжения и токи во входной цепи ИН,  $L_d = L_f + L_s + L_{ad}$  и  $L_q = L_f + L_s + L_{aq}$  – эквивалентные индуктивности СГ и фидера связи СГ с ИН,  $\omega$ ,  $\Psi_f$  – циклическая частота ЭДС СГ и потокосцепление, обусловленное постоянными магнитами.

Входные напряжения ИН ( $u_d$ ,  $u_q$ ) связаны с напряжениями в системе управления ( $u_{yd}$ ,  $u_{yq}$ ) соотношением вида:

$$\begin{bmatrix} u_d & u_q \end{bmatrix}^t = k_u \begin{bmatrix} u_{yd} & u_{yq} \end{bmatrix}^t,$$

где коэффициент усиления ИН  $k_u$  определяется как

$$k_u = \begin{cases} U_n / 2U_{on} & \text{– при синусоидальной ШИМ,} \\ U_n / \sqrt{3}U_{on} & \text{– при SVPWM.} \end{cases}$$

Активная ( $P$ ), реактивная ( $Q$ ) и полная мощности ( $S$ ) на входе ИН определялись с помощью известных соотношений [1]:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(\mathbf{u}, \mathbf{i}) = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q), \\ Q = \frac{3}{2}[\mathbf{u}, \mathbf{i}] = \frac{3}{2}(u_d i_q - u_q i_d), \\ S = [P^2 + Q^2]^{\frac{1}{2}}. \end{cases}$$
(2)

Полагая  $L_d \approx L_q$ ,  $L_f = 0$  и вводя относительные единицы с базовыми величинами вида  $\omega_\delta = \omega_{\min}$  – минимальная циклическая частота ЭДС СГ,  $U_\delta = \omega_{\min} \Psi_f$ ,  $S_\delta = 3(U_\delta)^2 / 2\omega_\delta L_d$ , используя уравнения (1) и (2), получим:

$$\frac{\left(u_d^* - \frac{\omega^*}{2} \cdot \operatorname{tg}(\varphi)\right)^2}{\left(\frac{\omega^*}{2 \cos(\varphi)}\right)^2} + \frac{\left(u_q^* - \frac{\omega^*}{2}\right)^2}{\left(\frac{\omega^*}{2 \cos(\varphi)}\right)^2} = 1,$$
(3)

где  $\varphi$  – угол сдвига между выходным напряжением и током СГ.

Соотношение (3) представляет собой уравнение окружности с центром в точке с координатами  $(\operatorname{tg}(\varphi) \cdot \omega^* / 2, \omega^* / 2)$  и радиусом  $R_2 = \omega^* / 2 \cos(\varphi)$ .

Для случая, когда коэффициент мощности СГ равен единице (в предлагаемой модели это соответствует условию  $\varphi = 0$ ), годограф напряжений  $u_d$  и  $u_q$  будет иметь вид, приведенный на рис. 2. Как следует из рис. 2, при условии  $\cos(\varphi) = 1$  напряжение СГ должно

существенно изменяться при изменении частоты вращения вала СГ. Для поддержания постоянства напряжения на нагрузке появится необходимость снижения глубины модуляции в ИН, что приведет к значительному снижению коэффициента искажений тока СГ [1] и, как следствие, к уменьшению коэффициента мощности СГ.

Для получения оптимальных энергетических характеристик и массогабаритных показателей системы предлагается выбрать параметры генератора так, чтобы рабочая точка, соответствующая номинальной мощности с  $\cos(\varphi)=1$ , соответствовала бы крейсерской скорости самолета. Тогда на низких оборотах с максимальной нагрузкой, когда входного напряжения недостаточно для формирования требуемого напряжения, путём формирования опережающего (емкостного) входного тока можно «довозбудить» генератор и поднять напряжение до требуемой величины. На высоких оборотах и холостом ходу путём формирования отстающего (индуктивного) тока снижается величина суммарного потокосцепления в зазоре генератора, и напряжение уменьшается до требуемой величины. Некоторые энергетические характеристики системы для такого выбора параметров приведены на рис. 3.

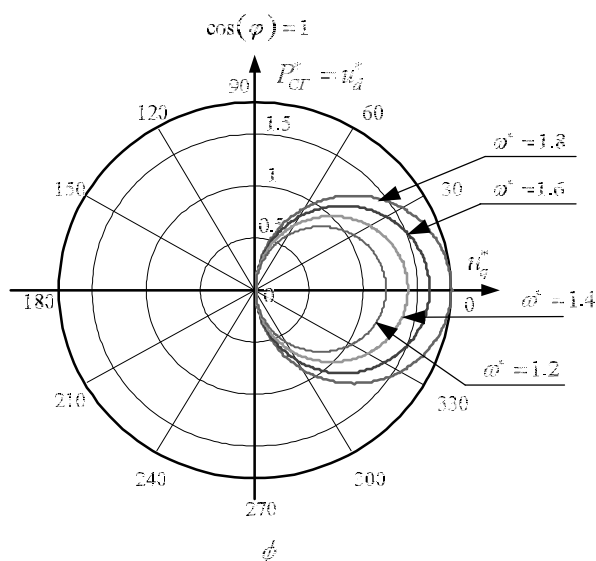


Рис. 2. Годограф напряжений  $u_d$  и  $u_q$  при  $\cos(\varphi)=1$

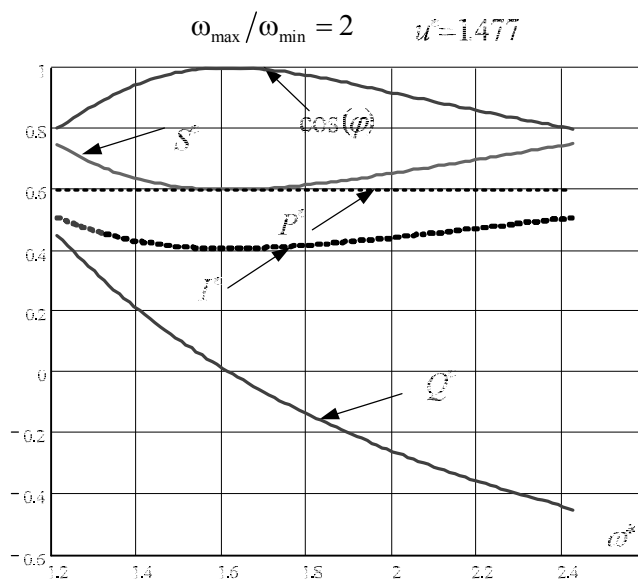


Рис. 3. Зависимость энергетических параметров СГ от частоты вращения вала

Данный способ выбора параметров был принят при проведении имитационного моделирования.

### Имитационное моделирование СГПН-270В на базе МЭГ и АВ

Имитационное моделирование проводится с помощью специализированного пакета программ PSIM. PSIM – программный пакет, предназначенный для моделирования устройств силовой электроники совместно с электромеханическими устройствами.

Основные электрические параметры системы генерирования.

1. Номинальная выходная мощность: 120 кВт.
2. Номинальное выходное напряжение: 270 В.
3. Требования к качеству выходного напряжения по ГОСТ Р 54073-2010.
4. Частота вращения вала СГ  $n = 8000 \div 16000$  об/мин, частота напряжения МЭГ  $f_r$ :  $800 \div 1600$  Гц.
5. Распределение нагрузки в функции частоты вращения вала МЭГ:
  - 50% от номинальной нагрузки (длительно) в диапазоне  $n = 8000 \div 10000$  об/мин;
  - 100% от номинальной нагрузки (длительно) в диапазоне  $n = 10000 \div 16000$  об/мин;
  - 150% от номинальной нагрузки (кратковременно) в диапазоне  $n = 13000 \div 16000$  об/мин.
6. Ток короткого замыкания кратностью не менее 3-х от номинального значения (кратковременно).

Упрощенную модель генератора с возбуждением от постоянных магнитов можно представить схемой замещения в виде последовательной *RLE* цепи, так как в общем случае МЭГ является неявнополюсной машиной. На основании данных из предварительных расчетов МЭГ на соответствующую мощность и уровень выходного напряжения активное сопротивление фазы генератора можно принять равным 20 мОм, индуктивность 20 мкГн, зависимость действующего значения фазной ЭДС генератора от частоты  $f_r$ :

$$E_{CF,rms} = 0,121 \cdot f_r$$

В отличие от ранее рассмотренной схемы, показанной на рис. 1, при моделировании использовалась немного модифицированная схема, которая приведена на рис. 4. Изменения заключаются в том, что для распределения токовой загрузки применён не один модуль АВ, а 8 параллельно включённых модулей, и, чтобы равномерно распределить токи, в каждом модуле установлены свои дроссели величиной 100 мкГн, к точке подключения дросселей каждой фазы подключен фильтровой конденсатор ёмкостью 0,1 мкФ. Ёмкость конденсатора звена постоянного тока - 9,9 мФ. Частота ШИМ - 75 кГц.

Для оценки КПД использована тепловая модель транзистора IXFN110N60P3 компании IXYS в пакете программ PSIM.

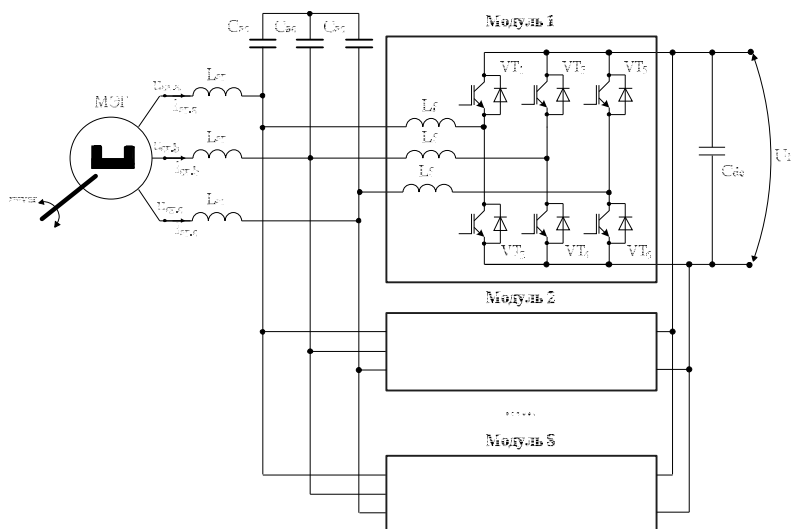


Рис. 4. Схема имитационной модели СГПН-270В на базе МЭГ и АВ.

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента мощности генератора от частоты генерируемого напряжения и мощности нагрузки. Как предполагалось, на номинальной нагрузке в середине диапазона изменения частоты генератора коэффициент мощности близок к единице, с уменьшением нагрузки и изменением частоты он уменьшается, при этом с уменьшением частоты генератора входной ток преобразователя опережает напряжение, а с увеличением частоты – отстает, что хорошо видно на эпюрах, показанных на рис. 6 – 8. На этих же эпюрах видно, что система формирует на выходе заданное напряжение величиной 270 В.

При снижении коэффициента мощности генератора увеличивается ток генератора, что приводит к увеличению токовой загрузки как самого генератора, так и элементов АВ, в результате увеличиваются потери в системе и снижается КПД, что видно на рис. 9 – 11.

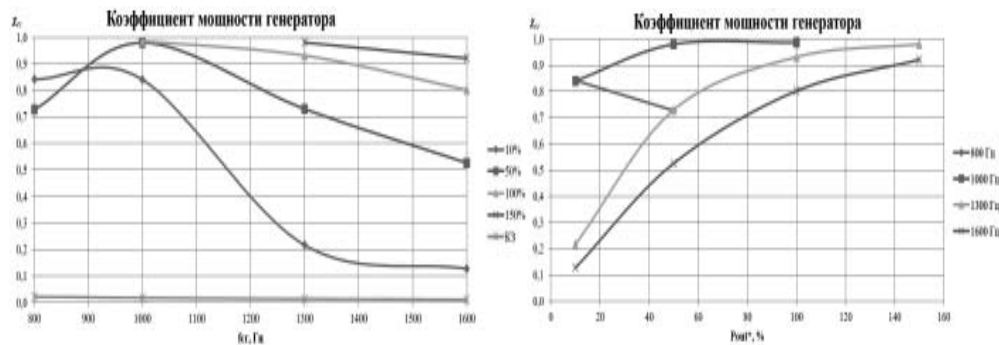


Рис. 5. Зависимости коэффициента мощности генератора от частоты генератора (слева) и от разной мощности нагрузки (справа)

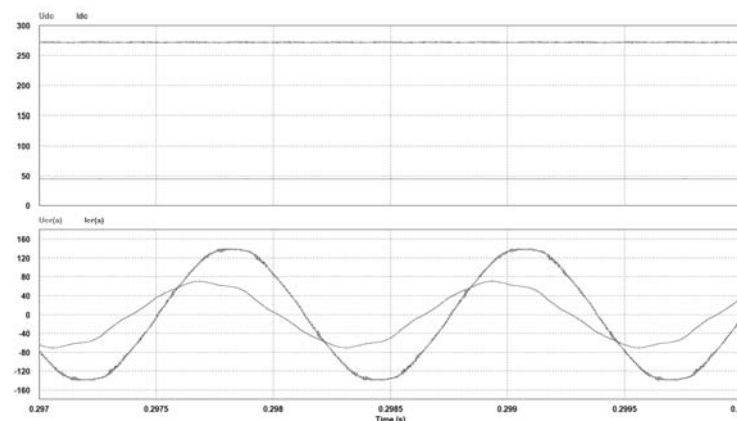


Рис. 6. Эпюры выходного напряжения и тока преобразователя (вверху) и напряжения и тока генератора (внизу) при 800 Гц 10% нагрузки

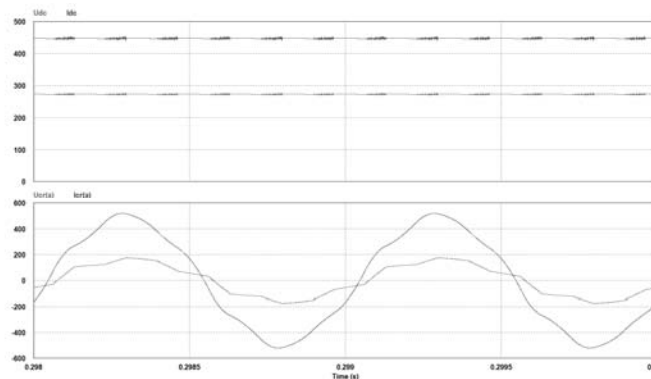


Рис. 7. Эпюры выходного напряжения и тока преобразователя (вверху) и напряжения и тока генератора (внизу) при 1000 Гц 100% нагрузки

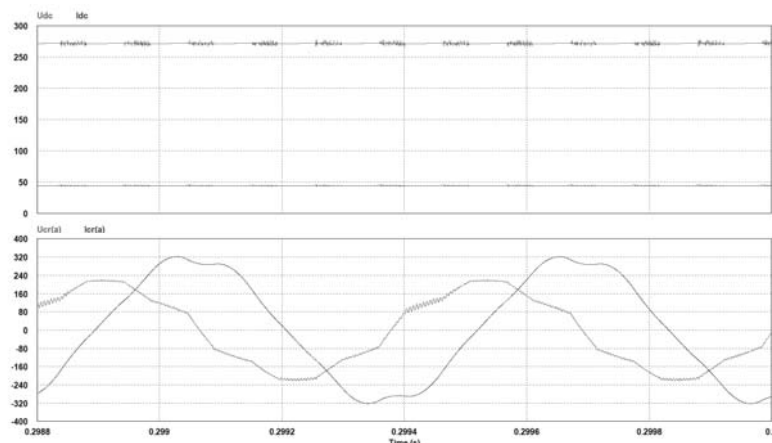


Рис. 8. Эпюры выходного напряжения и тока преобразователя (вверху) и напряжения и тока генератора (внизу) при 1600 Гц 10% нагрузки

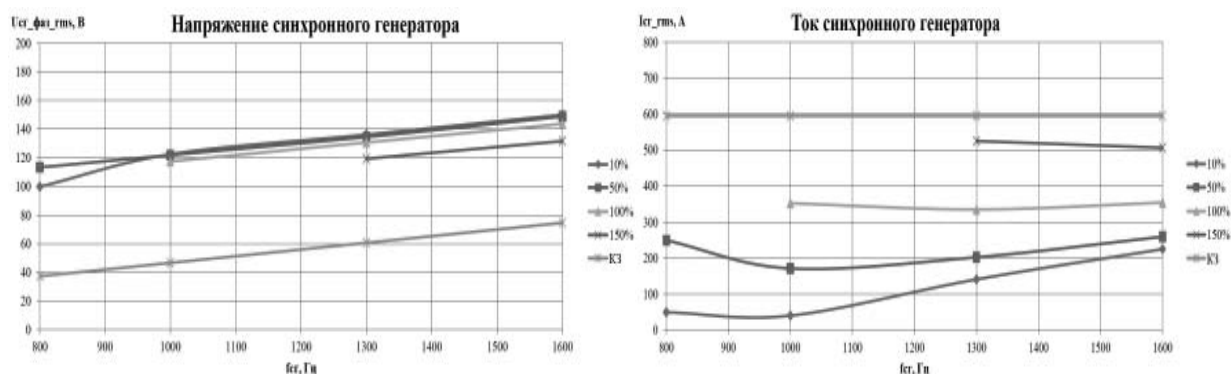


Рис. 9. Зависимости действующего значения фазного напряжения (слева) на выходе генератора и его тока (справа) от частоты при разной мощности нагрузки.

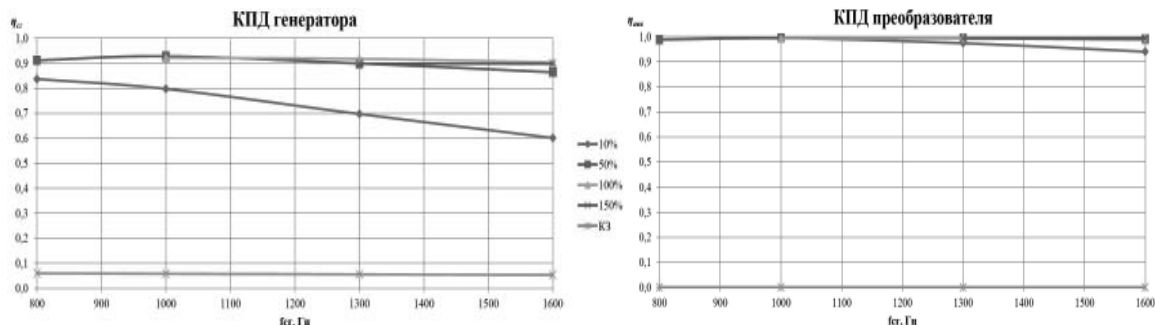


Рис. 10. Зависимости КПД генератора (слева) и КПД АВ (справа) от частоты при разной мощности нагрузки

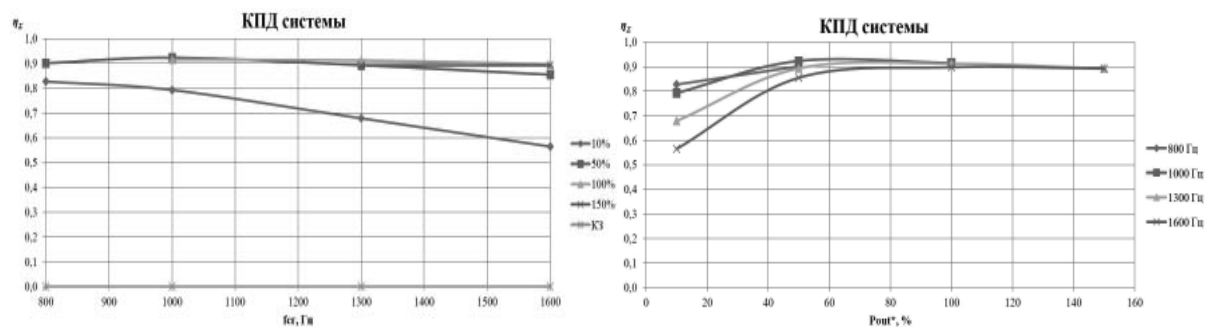


Рис. 11. Зависимости КПД СГПН-270В от частоты генератора (слева) и от мощности нагрузки (справа)

**Выводы**

1. Способ стабилизации выходного напряжения АВ за счёт изменения угла формируемого входного тока может быть применим для авиационной системы генерирования постоянного тока.
2. Наилучшие энергетические показатели (входной коэффициент мощности, КПД) системы получились при частоте генератора 1000 Гц и диапазоне нагрузок 50% – 100%.
3. Максимальная полная мощность генератора равна 199,6 кВА, что на 11% превышает максимальную мощность нагрузки (180 кВт).
4. При наличии источника в звене постоянного тока данная система может применяться в режиме электростартерного запуска.

**Список используемой литературы:**

1. S. Kharitonov. An Analytical Analysis of a Wind Power Generation System Included Synchronous Generator with Permanent Magnets, active rectifier and Voltage Source Inverter. Wind Power. Pp. 23-72 ISBN 978-953-7619-81-7. Editor by S.V. Mueen, 2010 Intech, First published June 2010, Printed in India, p. 558.
2. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В двух томах/ под редакцией С.А. Грузкова. – М. Издательство МЭИ, 2005 – Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – 2005. – 568 с.: ил.
3. Электрический самолёт: от идеи до реализации. Монография/ А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв// М.: Машиностроение, 2010. – 288 с. с табл. и ил.
4. <http://www.boeing.ru/Новости/787-Updates/Электросистема-самолета-787>.

**References:**

1. S. Kharitonov. An Analytical Analysis of a Wind Power Generation System Included Synchronous Generator with Permanent Magnets, active rectifier and Voltage Source Inverter. Wind Power. Pp. 23-72 ISBN 978-953-7619-81-7. Editor by S.V. Mueen, 2010 Intech, First published June 2010, Printed in India, p. 558.
2. S.A. Gruzkov. Aircraft electrical equipment, part 1: aircraft power generation systems [Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov, tom 1: sistemi elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov], publishing house of Moscow Institute of High-Power Engineering, 2005, p. 568.
3. A.V. Levin, I.I. Alekseev, S.A. Kharitonov, L.K. Kovalev. More electrical aircraft: from idea to realization [Elektricheskij samolet: ot idei do realizatsii], Moscow, Mashinostroyeniye, 2010, p. 288.
4. <http://www.boeing.ru/Новости/787-Updates/Электросистема-самолета-787>.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.